研究報告

改良リングせん断試験機の試作とその性能*

The Improvement of An Annular Shear Tester and It's Performance

後藤 昭博**
Akihiro GOTOH

河村 光隆**
Mitsutaka KAWAMURA

松島 弘輝***
Kohki MATSUSHIMA

綱川 浩****
Hiroshi TSUNAKAWA

1. 緒言

粉体の流動性を規定する物理量の要素として、せん断による内部摩擦係数および付着力がある。

従来の内部摩擦係数の測定方法には大別して、三軸圧縮試験法と直接せん断試験法に分類されるであろう。このうち、三軸圧縮試験法はモールの限界破壊応力説の理論に基づいているため、理想的な方法と考えられるが、一面、試験方法が煩雑である。したがって、対象となる粉体が限定されている土質力学の分野では利用されているようであるが、広範囲な材料を対象とし、しかも雰囲気の変化しやすい粉体には必ずしも適当であるとはいえない。そこで主として簡便性の利点から、直接せん断試験法が利用されている。

従来から利用されている直接せん断試験には、一定方向にせん断する方法^{4, 5, 11, 12)}と回転方向にせん断する方法^{2, 6, 8)}がある。前者はせん断箱を重ねる簡便な装置であるが、せん断変位が有限であること、せん断箱の形状や大きさの影響を受けやすい欠点がある。後者はリング式と呼ばれ研究されて来たが、従来の方法では、破壊包絡曲線（以後 Y. L. と呼ぶ）を求める場合、垂直荷重を数回変化させる必要があり、また最大積載荷重も数 kg と限界があるため、応力の広範な粉体せん断特性を求めることは困難であった。またリング式では、構造上固定セルと可動セルとの間隙から粉体がもれる欠点も指摘されている³⁾。

本研究では、定容積型直接せん断試験機^{11, 12)}の特徴を念頭に置き、広範囲な環境のもとでの多種類の粉体のせん

断特性を簡便に、しかも再現性良く測定するためリング型直接せん断試験機を考案し、試作した。またその性能を代表的な供試粉体を使用して検討し、従来の測定結果と比較考察した。

なお、本研究は、蓄熱、蓄水素用粉体として使用される金属水素化合物の、加圧、加熱されたガス雰囲気での充てん特性の研究^{6, 7)}に資することを最終的な目的として実施されたものである。

2. 改良リングセルせん断試験機の特徴

従来の試験機の特徴を参考にして、以下のような改良を加えた。

1) 試料の経時変化などを測定する場合、一度の試料充てんで反復測定可能とすること、せん断変位が有限でないことなどから、リング式とした。

2) 従来のリング式では前述のように、ある垂直荷重に対して一点の測定値が得られるだけであるので、Y. L. を得るには、垂直荷重を個別に変化させねばならない不便があった。また載荷重も限界があったので、測定範囲も限定された。この欠点に対して、改良型ではモータ駆動または手動によるプレス載荷方式を採用し、その垂直荷重の検出はロードセルを使用して行なうこととした。この方式によれば最大垂直荷重も大きくとれるので、測定可能範囲も広がり、実用的である。また垂直荷重は連続的に変化させるるので Y. L. は数分以内の短時間で得ることができる。測定が短時間であるので、従来のリング式の欠点でもあった固定セルと可動セルとの間隙からの粉体のもれもごく少量で済む。さらに垂直荷重測定にロードセルを使用しているため負の荷重すなわち引張り力も測定可能であることなど、多くの長所を有する。

3) セン断力はリング式の場合トルクとして検出するのであるが、従来のリング上セルはトルク検出のため完全には固定でないので不安定となり、せん断面、セル間

昭和57年11月8日受付

*昭和56年秋期例会にて発表

**化学技術研究所(〒305 茨城県筑波郡谷田町東 1-1)

TEL 0298-54-4728

***マキタエンジニアリング

****横浜国立大学工学部化学工学科

1. load cell
2. pressure vessel
3. torque meter
4. handle
5. lid
6. motor

Fig. 1 改良せん断試験機の外観

1. lid for pressing powder
2. powder
3. ball bearings
4. fixed upper cell
5. movable lower cell
6. O ring seal
7. pressure vessel

Fig. 2 リングセルの詳細図

隙などが変動して再現性の良い結果が得られない恐れがあること、プレス方式の場合上セルにトルクメータを取付けると垂直応力とトルクメータ出力とが互に影響を及ぼし合い正しい結果が得られないこと、トルクメータを上セルに取付けるのは構造的に無理があることなどの理由により、トルクメータは下セル（可動セル）に取付ける方法とした。その結果、取付けは回転駆動モータとセルの間で良いので構造的に容易である。垂直荷重はボールベアリングで支持しているため、せん断力は直接の影

Fig. 3(a) セルの外観

Fig. 3(b) 蓋の粗面化

響は受けず、ベアリングの摩擦力のみを考慮すれば良い。また上セルは固定できるのでセル間隙は任意に設定可能でしかもセルの上下変動によるせん断面の変動もないなどの長所が考えられる（Fig. 2 参照）。

以上のせん断試験方法を具体化試作したのが Fig. 1 であり、また Fig. 2 にはセル詳細図を図示した。設計の際もっとも留意した点は、可動下セルからトルクを検出するので下セルの回転部分と固定部分との摩擦を最小限とすることであり、そのために、ボールベアリングを利用しころがり摩擦とした。

試験機の形状および性能については、セルは Fig. 3(a) に示す外観で外径 100 mm、内径 60 mm であり、垂直応力測定用ロードセルの定格荷重は 2000 N、トルクメータの定格トルクは約 10 N・m、セル回転数は 1/1560 rpm である。

また蓋は供試粉体とのスベリを防ぐため Fig. 3(b) のように粗面化されている。

なお、本試験機は加減圧ガス雰囲気でも使用できるように、せん断セル部分は圧力容器の中に設置した。圧力容器の気密は Fig. 2 に示すように、プレス支持軸と回転軸を O リングを介して閉じられている。特に回転軸の O リングはトルク出力への影響を少なくするために小さな O リングを使用している。

Fig. 4 トルクメータの零点の変動

Fig. 5 トルクメータ出力と回転モーメントとの検定方法

Fig. 6 トルクメータと回転モーメント検定曲線

3. 試験機の検定

本試作試験機でもっとも重要な点は、試験機の工作精度と検定であろう。試作された試験機により得られたデータに信頼性があるかどうかにより実用的かどうかが決まるからである。以下実施した検定のいくつかを示す。

1) リングセル回転による零点の変動

せん断力検出用のトルクメータの零点は測定値のベースとなるので大切である。このリングセル回転による零点の変動の原因は主としてギアあるいは回転部分の工作精度に依るものと考えられる。検定記録の一部を Fig. 4 に示す。この記録によれば、零点の変動は $20 \mu \text{ strain}$ 以内であり、トルクメータ定格値 $3000 \mu \text{ strain}$ の 0.7% 以

Fig. 7 せん断応力に及ぼす垂直応力の影響

内であるので実用上問題はない。測定結果を変動値で補正すればさらに測定精度は向上する。

2) トルクメータとせん断力との変換

変換係数はトルクメータ出力値 T_r とせん断応力の換算に使用する回転モーメント M との比とする。したがってギアなどによる損失が一括して含まれることになる。

検定方法は、Fig. 5 に示すように 180° 対称的な二個所に各々等しい荷重をリング回転接線方向にかけて行なった。検定値の変動は $\pm 2\%$ 以下でその結果を Fig. 6 に示す。

次に回転モーメントとせん断応力 τ との関係は次式より計算される。したがってトルクメータ出力値からせん断応力 τ を求めることができる。

$$M = \int_{r_2}^{r_1} 2\pi r \tau r dr \quad \dots\dots(1)$$

$$\tau = \tau_0 = 3M / 2\pi(r_2^3 - r_1^3) \quad \dots\dots(2)$$

ここで τ_0 は無負荷時のせん断応力で零点の変動値に相当し、実際には無視しうる程度の値である。

3) 変換係数に及ぼす垂直応力の影響

せん断試験測定時には、垂直応力を連続的に変化させるので、変換係数に対する垂直荷重の影響を検定しておく必要がある。検定方法は下の回転セルに最大 600 N の荷重をのせて、零点の変化を検定した。その結果を Fig. 7 に示す。図によれば、荷重による影響は、回転による零点の変動に比較して無視できる程小さいことが分った。したがって、実験範囲内では、負荷時の変換係数は無負荷時とほぼ同一と考えてよい。これは回転セルと固定台との摩擦をころがり摩擦としたことによると考えられる。

4) ロードセルに及ぼすせん断力影響

ロードセルに及ぼすせん断力影響も検定しておく必要がある。検定方法はロードセル軸方向へは無負荷とし、2)の場合と同様な方法で接線方向へ荷重をかけて行なった。その結果影響は皆無に近かった。これはロードセルに対するねじりの影響を最小限とするため、ゲージが軸方向ではなく半径方向に貼付されているためであると考えられる。

5) その他、色の異なる類似粉体（ガラス球の場合豊

Fig. 10 炭酸カルシウム P-30 のせん断試験

Fig. 11 得られた付着力と他の測定結果との比較

ところ、測定条件が異なるので必ずしも適切とはいえないが、上側の包絡線は動的せん断に近い値を示し、下側の包絡線は静的せん断に近い値を示している。

ガラス球の場合のセル間隙からの粉体の漏れは、1回の測定試験で約 0.14 g (セル充填全試料約 100 g) とごく少量であった。またせん断付着力は、わずかに見られたが定量的に把握するまでには至らなかった。

6.3 炭酸カルシウム P-30

粉体物性測定の基準粉体として使用されている炭酸カルシウム P-30 についての測定結果を Fig. 10 に示す。この図には圧密せん断崩壊過程の結果も示してある。すなわち (垂直応力の減少, せん断応力の増加 → プレスによる圧密 → 空隙率の減少, 垂直応力の増加) のくり返し操作において、圧密の程度が増すに従って、せん断応力の増加割合が減少し、遂には増加しなくなる点が存在することが分る。

この Y.L. は相馬砂、ガラス球比較して上に凸の曲線であり、またこの粉体ではガラス球のようなループは現れなかった。

測定結果から得られたせん断付着力はくり返し測定で 2.0~2.6 kPa (空隙率 0.52~0.53) であった。粉体物性

Fig. 12 炭酸カルシウム P-30 での (τ/C) 対 $(\sigma/T+1)$ との関係

グループ会報告¹³⁾の種々の測定装置により得られたデータとの比較を Fig. 11 に示す。

また炭酸カルシウム P-30 での粉体の漏れはガラス球よりも少なかった。これは炭酸カルシウムが流動性に乏しいことに起因するものと考えられる。

なお炭酸カルシウムせん断試験は相対湿度 65~55% の範囲で行なった。

6.4 せん断試験結果の定量化

実験により得られたせん断特性を定量化するために、Warren Spring の式¹⁾を適用した。

$$\left(\frac{\tau}{C}\right)^n = \frac{\sigma}{T} + 1 \quad \dots\dots(3)$$

C はせん断付着応力、n はせん断指数、T は引張応力で実験値からこれらの値を求め、 $\log(\tau/C)$ 、 $\log(\sigma/T+1)$ を計算した。炭酸カルシウム P-30 についてパラメータを予圧密時間とした結果を Fig. 12 に示す。圧密時間が短い場合はわずかに凸状の曲線となり一方圧密時間が長くなると直線状に近づき、せん断指数 n を求めると 1.77 となった。予圧密時間が短い場合も垂直応力の大きい範囲を除けば、ほぼ同一のせん断指数が得られる。またこの結果は、予圧密時間が長くなる程付着応力が大きくなることを示している。

7. 結 言

短時間で粉体のせん断試験、付着力測定が同時にできる方法を考案し、改良リングせん断試験機を試作した。またその性能を代表的な粉体を使用して検討した結果、大略以下の事柄が明らかとなった。

改良リングせん断試験機は、従来の試験機に比較して、広範囲の応力でしかも短時間で粉体の破壊包絡線を、連続線として得ることができる。したがって従来の装置で欠点とされたセル間隙からの粉体の漏れも無視できる程度にわずかであった。またせん断付着応力をも測定することができる。

基準粉体である炭酸カルシウムを使用して、せん断付着応力を測定し、他の装置による結果と比較したところ良好な一致が見られた。

本改良リング式せん断試験機を利用すれば、粉体のせん断試験を簡便にかつ短時間で測定可能であり、また試験結果は信頼性を有することが確かめられた。

引用文献

- 1) Ashton, D.M.: *Rheol. Acta*, 4, 206 (1965)
- 2) Bundy, T.J.: *Powder Technology*, 15, 197 (1979)
- 3) Carr, J.F. & D.M. Walker: *Powder Technology*, 1, 228 (1967)
- 4) Jenike, A.W.: Bulletin 108, Eng. Expt. Sta., Utah State Univ., 1961
- 5) 広田ら: 粉体工学会誌, 16, No. 4, 199 (1979)

- 6) 河村ら: 化学工学協会第14回秋期大会要旨集, 844 (1980)
- 7) 河村ら: 化学工学協会第15回秋期大会要旨集 (1981)
- 8) 鈴木ら: 粉体工学会誌, 17, No. 10, 559 (1980)
- 9) 鈴木ら: 粉体工学会誌, 17, No. 8, 450 (1980)
- 10) 種谷ら: 粉体工学研究会誌, 11, 199 (1974)
- 11) 綱川ら: 粉体工学研究会誌, 11, 263 (1974)
- 12) 綱川ら: 粉体工学会誌, 15, 342 (1978)
- 13) 大塚ら: 粉体工学会誌, 18, 591 (1981)

Authors' Abstract

The Improvement of An Annular Shear Tester and It's Performance by

Akihiro GOTOH¹⁾, Mitsutaka KAWAMURA¹⁾, Kohki MATSUSHIMA²⁾,
Hiroshi TSUNAKAWA³⁾

- (1) National Chemical Laboratory for Industry
- (2) Makita Engineering
- (3) Yokohama National University

A new type of annular shear tester was designed. The normal stress is measured with a load cell which is coaxially installed on the fixed upper cell. The shear stress is detected by the torque meter installed between a movable lower cell and a driving motor. The movable lower cell is supported with many ball bearings in order to minimize the friction force.

These devices enable us to conduct the continuous measurement of the yield locus of powders. Besides, the cohesive force is simultaneously measured.

The maximum normal stress applied reaches 4 Kg/cm² which corresponds to the stresses of powder in real bunkers.

The shearing results measured by this apparatus were favourably compared with those measured by other current shear testers.

List of Figures

- Fig. 1 Outline of improved annular tester
- Fig. 2 Detail of annular shear cell
- Fig. 3(a) Photo of cell
(b) Roughened surface of lid
- Fig. 4 Zero Shift of torque meter
- Fig. 5 Calibration method between torque meter and rotational moment
- Fig. 6 Calibration curve between torque meter and rotational moment
- Fig. 7 Effect of normal stress on base of shear

stress

- Fig. 8 Typical yield locus for Soma sand
- Fig. 9 Typical yield locus for glass beads
- Fig. 10 Typical yield locus for calcium carbonate P-30
- Fig. 11 Comparison of the cohesive force obtained with the other results
- Fig. 12 Relationship Between (τ/C) and $(\sigma/T+1)$ for calcium carbonate P-30